Radiopropagação

1º Semestre 08/09

Formulário

NOTA: Inclui apenas as expressões usadas ou deduzidas nas aulas práticas. Exclui tópicos extra e correspondentes expressões apresentadas nas aulas teóricas.

Propagação em Espaço Livre

- Potência recebida: $P_r = \dfrac{P_e G_e G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}$
- Fórmula de Friis: $\left.\left(\dfrac{P_r}{P_e}\right)\right|_{\text{dB}} = \left.(G_e)\right|_{\text{dB}} + \left.(G_r)\right|_{\text{dB}} - 21.984 - 20\log\left(\dfrac{d}{\lambda}\right)$
- Campo máximo: $E = \dfrac{\sqrt{60 P_e G_e}}{d}$
- Radar monoestático: $\dfrac{P_r}{P_e} = \dfrac{G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 d^4}$
- Radar biestático: $\dfrac{P_r}{P_e} = \dfrac{G_e G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 d_1^2 d_2^2}$

Reflexão no Solo

- Coeficientes de Fresnel: $\Gamma_H = \dfrac{\sin\psi - \sqrt{n^2 - \cos^2\psi}}{\sin\psi + \sqrt{n^2 - \cos^2\psi}}$

$$\Gamma_V = \frac{n^2 \sin\psi - \sqrt{n^2 - \cos^2\psi}}{n^2 \sin\psi + \sqrt{n^2 - \cos^2\psi}}$$

- Ângulo de Brewster: $\psi_B = \cos^{-1}\dfrac{n}{\sqrt{1+n^2}}$
- Radar a baixa altitude: $\dfrac{P_r}{P_e} = 4\pi \dfrac{G^2\sigma}{\lambda^2}\dfrac{(h_1 h_2)^4}{d^8}$
- Zona de Interferência (Terra Plana)

Campo: $E = E_d\left[1 + |\Gamma| \exp(j\phi)\right]$ com $\phi = \arg\{\Gamma\} - k\Delta r$ e $\Delta r \approx \dfrac{2h_1 h_2}{d}$

Critério: $\Delta\phi \ll 1$ com $\Delta\phi \approx \frac{2\pi}{\lambda}\frac{h_1 h_2}{h_1+h_2}\frac{d}{a}$

Extremos do campo: $d_n = \frac{4h_1h_2}{(n-1)\lambda}$ com $n = 2,3,...$

Máximos: n par, $\left(\frac{E}{E_d}\right)_{\max} = 1+|\Gamma|$

Mínimos: n ímpar, $\left(\frac{E}{E_d}\right)_{\min} = 1-|\Gamma|$

- Zona de Interferência (Terra Esférica)

Campo: $E = E_d\left[1+|\Gamma_e| D\exp(j\Delta\phi)\right]$ com $\Delta\phi = \arg\{\Gamma_e\} - k\Delta r$ e $\Delta r \approx \frac{2h_1'h_2'}{d}$

Factor de reflexão: $\Gamma_e \approx \Gamma_H, \Gamma_V$ se $2\pi\frac{a}{\lambda}\frac{\sin^3\psi}{\cos^2\psi} > 1$

Ponto especular: $\begin{cases} d_1^3 - \frac{3}{2}dd_1^2 + \left[\frac{d^2}{2} - a(h_1+h_2)\right]d_1 + h_1 da = 0 \\ d_2 = d - d_1 \end{cases}$

Aproximação: $d_{1_{TE}} = d_{1_{TP}} + S$ com $S = -\frac{d_{1_{TP}}^3 - \frac{3}{2}dd_{1_{TP}}^2 + \left[\frac{d^2}{2} - a(h_1+h_2)\right]d_{1_{TP}} + h_1 da}{3d_{1_{TP}}^2 - 3dd_{1_{TP}} + \left[\frac{d^2}{2} - a(h_1+h_2)\right]}$

Divergência: $D = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{2d_1d_2}{ad\sin\psi}}}$

Alturas corrigidas: $h_{1,2}' = h_{1,2} - \frac{d_{1,2}^2}{2a}$, com $a = 6370$ km

Extremos do campo: $d_n = \frac{4h_1'h_2'}{(n-1)\lambda}$ com $n = 2,3,...$

Dispersão em Superfícies Rugosas

- Critério de Rayleigh: $\frac{h}{\lambda}\sin\psi \ll 1$
- Parâmetro de rugosidade: $s = \frac{2h_e}{l}$
- Área efectiva de dispersão (AED): $\frac{\delta P_s}{\delta P_{s_M}} = e^{-\tau^2}$ ou $\tau = \sqrt{-\left.\frac{\delta P_s}{\delta P_{s_M}}\right|_{dB}\frac{\ln(10)}{10}}$

- Dimensões da AED: $y_t = \tau s h$

$$x_l = -\frac{h}{2\tau s} + \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2\tau s}\right)^2}$$

$$\text{Se } t \gg 2\tau \text{ então } x_l \approx \frac{\tau s}{h}\left(\frac{d}{2}\right)^2 \text{, se } t \ll 2\tau \;\; x_l \approx \frac{d}{2} - \frac{h}{2\tau s}$$

- Secção eficaz de dispersão: $\frac{\sigma}{\sigma_M} = e^{-\frac{t^2u^2}{(1-u^2)^2}}$ com $u = \frac{x}{d/2}$ e $t = \frac{1}{s}\frac{h}{d/2}$

- Potência dispersada: $\frac{P_s}{P_d} = \int_{-1}^{1} f(t,u)du$ com $f(t,u) = \frac{t}{\sqrt{\pi}} \frac{\exp\left[-\frac{t^2u^2}{(1-u^2)^2}\right]}{(1-u^2)^2}$

- Radar clutter: $\frac{P_c}{P_d} = |\Gamma|^2 \frac{G_c^2}{G_A^2} \phi_1 \frac{1}{h^2} \frac{d_A^4}{\sigma_A} \exp\left[-\left(\frac{\rho_1}{sh}\right)^2\right]$

Difracção em Obstáculos

- Elipsóides de Fresnel: $D_n \approx \sqrt{\frac{4n\lambda d_1 d_2}{d}}$

- Folga: $\overline{x} = \frac{(h_1 - h_{\text{obst}})d_2 + (h_2 - h_{\text{obst}})d_1}{d}$

- Impedimento: $v = -h_e$ com $h_e = \sqrt{\frac{kd}{\pi d_1 d_2}}\overline{x}$

- Intensidade: $I \approx \left(\frac{0.225}{v}\right)^2$ se $v > 5$

- Zona de Fresnel: $\Delta\phi = \frac{k}{8}\frac{\left(h_{\text{obst}} - h_2\right)^4}{d_2^3} \ll 1$

Difracção à Superfície da Terra

- Campo em espaço livre do emissor de referência: $E_{0_{\text{r.m.s.}}} = \frac{300}{d}\left[\text{Vm}^{-1}\right]$

- Potência radiada: $P_r = \eta P_e$.

- Antenas ao solo: $h_1 = h_2 = 0$

- Directividade do monopólo: $D_{\text{mono}} = 2D_{\text{dip}}$

- Antenas sobrelevadas: $E_{\text{r.m.s.}} = 2 \times \frac{\sqrt{30 P_e G_e}}{d}$

Refracção na Baixa Atmosfera

- Índice de refracção: $n(h) = 1 + 315\times10^6 e^{-0.136h}$ com $[h] = \text{km}$
- Refractividade: $N = (n-1)\times10^6$

$$N = \frac{77.6}{T}\left(p + 4810\frac{e}{T}\right) \text{ com } [p] = \text{mbar},\ [e] = \text{mbar e } [T] = \text{K}$$

- Raio equivalente da Terra: $a_e = Ka$ com $K = \dfrac{1}{1 + \dfrac{a}{n_0}\left(\dfrac{dn}{dh}\right)\Big|_{h=0}}$ com $n_0 = n(h=0)$
- Raio de curvatura: $\rho \approx \dfrac{K}{K-1}a$
- Gradiente vertical da refractividade: $\dfrac{dN}{dh} = -\dfrac{n_0}{a}\left(\dfrac{K-1}{K}\right)\times10^6$
- Desvio: $\Delta \approx \dfrac{d^2}{2a}\left(\dfrac{K-1}{K}\right)$
- Refractividade modificada: $M(h) \approx N(h) + \dfrac{h}{a}\times10^6$
- Equação da trajectória: $z = \displaystyle\int_{h_E}^{h} \frac{1}{\pm A\sqrt{M - M'}}\,dh'$

$$\text{com } A = \sqrt{2}\times10^{-3} \text{ e } M' = M(h_E) - \frac{\alpha_E^2}{2}\times10^6$$

- Perfil linear: $M = M_0 + \mu h$, então $z = \dfrac{2}{\pm A\mu}\left(\sqrt{\mu h + b} - \sqrt{\mu h_E + b}\right)$ com $b = -\mu h_E + \dfrac{\alpha_E^2}{2}\times10^6$

Propagação em Ductos

- Ducto sobrelevado: $m^2(l) = m_0^2 - m_0\mu l^2$ com $l = h - h_0$
- Perfil parabólico $m(l) \approx m_0 - \dfrac{\mu}{2}l^2$
- Solução da equação de onda: $\psi(l) = H_i\left(\sqrt{2}\dfrac{l}{w}\right)e^{-\frac{l^2}{w^2}}$, com $w^2 = \dfrac{2}{k_0\sqrt{m_0\mu}}$
- Frequências de corte: $f_{c_i} = (2i+1)\dfrac{\sqrt{m_0\mu}}{2\pi m_0^2}c$
- Critério de captação ($i = 1$): $\dfrac{\psi(l_m)}{\psi_{\max}} = e^{-\frac{l_m^2}{w^2}} \leq 1\%$

- Ducto superficial: $m^2(h) = m_0^2(1 - 2\mu h)$
- Perfil linear $m(h) \approx m_0(1 - \mu h)$
- Solução da equação de onda: $\psi(h) = p\,\mathrm{Ai}(v)$, com $p = (2b)^{-2/3}$ e $b = k_0^2 m_0^2 \mu$
- PH: $v = \rho_i + (2b)^{1/3} h$
- PV: $v = \rho_i' + (2b)^{1/3} h$

i	ρ_i	ρ_i'
1	−2.3381	−1.0188
2	−4.0879	−3.2482
3	−5.5206	−4.8201
4	−6.7867	−6.1633

- Frequências de corte: $f_{c_i} = |\rho_i|^{3/2} \dfrac{\mu c}{\pi m_0}$ (PH); $f_{c_i} = |\rho_i'|^{3/2} \dfrac{\mu c}{\pi m_0}$ (PV)
- Critério de captação: $v_m = v(h_m) > 3$

Absorção na Atmosfera

- Atenuação pelos gases: $A[\mathrm{dB}] = \alpha_{0_w} r_{e_w} + \alpha_{0_o} r_{e_o}$
- Lei de Ryde: $\alpha[\mathrm{dB/km}] = K R^{\gamma}$ em que $K[\mathrm{dB/km}] = \left[3(f-2)^2 - 2(f-2)\right] \times 10^{-4}$ e $\gamma = \left[1.14 - 0.07(f-2)^{1/3}\right]\left[1 + 0.085(f-3.5)\exp\left(-0.006 f^2\right)\right]$ com $[f] = \mathrm{GHz}$.
- Atenuação diferencial: $\alpha_d = \alpha_{\mathrm{II}} - \alpha_{\mathrm{I}}$
- Fase diferencial: $\varphi_d = \varphi_{\mathrm{II}} - \varphi_{\mathrm{I}}$
- $\begin{bmatrix} E_{r_\mathrm{V}} \\ E_{r_\mathrm{H}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{e_\mathrm{V}} \\ E_{e_\mathrm{H}} \end{bmatrix}$ com $T_{11} = T_{\mathrm{I}} \cos^2\phi + T_{\mathrm{II}} \sin^2\phi$, $T_{22} = T_{\mathrm{I}} \sin^2\phi + T_{\mathrm{II}} \cos^2\phi$ e $T_{12} = T_{21} = \dfrac{T_{\mathrm{II}} - T_{\mathrm{I}}}{2} \sin 2\phi$
- Coeficientes de polarização cruzada: $\mathrm{X_H} = \left.\dfrac{|T_{12}|}{|T_{22}|}\right|_{\mathrm{dB}} = 20\log\left.\left(\dfrac{E_{r_\mathrm{V}}/E_{e_\mathrm{H}}}{E_{r_\mathrm{H}}/E_{e_\mathrm{H}}}\right)\right|_{E_{e_\mathrm{V}}=0}$

$$\mathrm{X_V} = \left.\dfrac{|T_{21}|}{|T_{11}|}\right|_{\mathrm{dB}} = 20\log\left.\left(\dfrac{E_{r_\mathrm{H}}/E_{e_\mathrm{V}}}{E_{r_\mathrm{V}}/E_{e_\mathrm{V}}}\right)\right|_{E_{e_\mathrm{H}}=0}$$

Desvanecimento

- Distribuição de Rayleigh: $P(E < E_0) = \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{E_0}{E_m}\right)^2 \ln 2\right]\right\}^N$ em que N é o grau de diversidade.
- Distribuição Log-normal: $P(E < E_0) = \frac{1}{2}\left\{1 + \operatorname{erf}\left[\frac{\ln\left(\frac{E_0}{E_m}\right)}{\sqrt{2}\sigma}\right]\right\}$

Rádio-móvel

- Atenuação suplementar na macro-célula: $A[\text{dB}] = A_E(h_e) + A_{N+1}(\alpha)$
- Efeito sombra: $A_{N+1}(\alpha) = \left[3.502 g_p - 3.327 g_p^2 + 0.962 g_p^3\right]^2$ para $0.01 < g_p < 1$ com $g_p = \sqrt{\frac{W}{\lambda}} \sin\alpha$
- Efeito multipercurso: $A_E(h_e) = 0.225\sqrt{\frac{1}{h_{e_1}^2} + \frac{|\Gamma|^2}{h_{e_2}^2}}$ com $h_{e_1} = \sqrt{\frac{2\sin\Phi}{\lambda z}}\left[(h_m - h_e) + 2z\frac{\sin\alpha}{\sin\Phi}\right]$ e $h_{e_2} = \sqrt{\frac{2\sin\Phi}{\lambda(2W - z)}}\left[(h_m - h_e) + 2(2W - z)\frac{\sin\alpha}{\sin\Phi}\right]$